



NICOLAS GAMBARDILLA
8602C
DIRECTEUR DE RECHERCHE
AU CNRS

L'IA S'INVITE À L'HÔPITAL ALGORITHMES EN BLOUSE BLANCHE

Quelle que soit l'innovation technologique, il est quasiment certain qu'elle sera appliquée premièrement pour la mort (systèmes d'armements) puis pour la vie (domaine de la santé). Sans surprise, les premières applications de l'IA ayant rencontré un succès en vie réelle furent les modèles *Dendral* développés dans les années 1960 par le pionnier Edward Feigenbaum pour identifier des substances chimiques à partir de données de spectrométrie de masse et MYCIN1, du même Feigenbaum, qui une décennie plus tard identifiait des bactéries et recommandait des antibiotiques. L'IA symbolique étant déjà utilisable en pratique à cette époque, contrairement à l'IA connexionniste (les réseaux de neurones), ces outils étaient basés sur des systèmes experts (MYCIN fondait ses décisions sur une série d'environ 600 règles). Les systèmes experts sont devenus monnaie courante dans les années 1980, infiltrant tous les aspects du parcours patient. Après la victoire il y a une dizaine d'années de *Watson* sur les humains au jeu *Jeopardy* (un jeu télévisé américain où les joueurs doivent deviner une question à partir de sa réponse), IBM propose *Watson health*, pour des applications dans de nombreux domaines de la santé, notamment en oncologie. Malheureusement, le système ne fut pas à la hauteur des attentes, et après plusieurs tentatives, IBM jeta l'éponge. De fait, *Watson*, dernier héritier de l'IA symbolique, arri-

vait trop tard, au moment même où l'IA connexionniste explosait, avec notamment les prouesses surprenantes des réseaux à neurones de convolution en reconnaissance d'images.

L'utilisation de l'intelligence artificielle a depuis le début du XXI^e siècle envahi chaque aspect et chaque étape du parcours patient. La réussite n'est pas toujours à la mesure des espoirs et des annonces enthousiastes, mais les progrès sont néanmoins significatifs, que ce soit dans la prédiction des risques et des événements indésirables, la prévention des troubles, leur diagnostic, ou le groupement des patients pour une médecine personnalisée et de précision. L'IA offre également des perspectives intéressantes en termes d'épidémiologie et de santé publique.

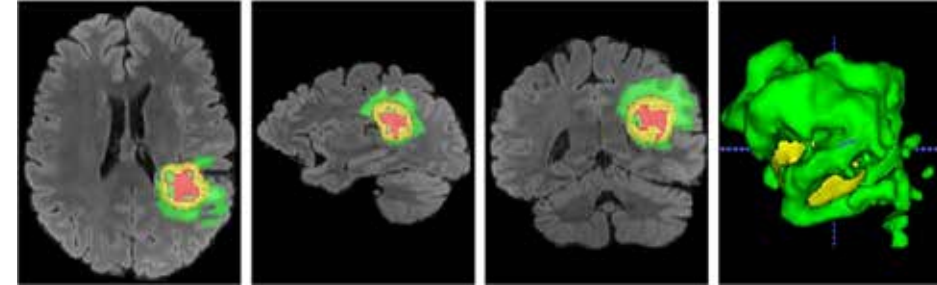
Prédiction des risques

Le meilleur moyen de faire économiser de l'argent au système de santé (mais pas aux caisses de retraites, rétorqueront les cyniques) est de prédire les risques d'affection et de prévenir leur survenue. Très tôt, des algorithmes ont été mis au point à cet effet, prenant en compte les antécédents familiaux et médicaux ainsi que les habitudes de vie, notamment... par les compagnies d'assurance. Le XXI^e siècle a changé la donne en permettant l'accès aux données génétiques, représentant le potentiel morbide d'un individu à sa naissance. L'auteur travaille ainsi à l'Institut Européen de

génomique du diabète (Egid), où l'on développe, par exemple, des algorithmes pour prédire les risques de développer un diabète de type 2, mais également l'horizon temporel de sa survenue, ce en prenant en compte données génétiques et cliniques, ou encore des modèles d'IA qui prédisent l'obésité infantile à la naissance. Les patients et leurs médecins peuvent alors mettre en place des interventions pour retarder ou même éviter l'apparition des troubles métaboliques. Historiquement, alors que ces algorithmes se basaient sur une combinaison d'approches statistiques (parfois très complexes), ils reposent aujourd'hui de plus en plus sur des modèles d'apprentissage profond. Les risques à la naissance sont désormais "mis à jour" au cours de l'existence en prenant en compte l'influence du style de vie, notamment à travers les données d'"épigénétique", c'est-à-dire les modifications du génome spécifiques de chaque type cellulaire via lesquelles l'environnement, par exemple la nutrition, affecte son expression, mais également l'état instantané des sujets via leur tableau clinique. L'IA ne se contente pas de prédire les risques à long terme. Certains hôpitaux ont, par exemple, déployé des modèles à même de prédire les risques d'événements cardiovasculaires graves à partir des électrocardiogrammes et des dossiers patients.

Diagnostic et stadification

Comme on ne peut pas toujours préve-



Visualisation d'une tumeur cérébrale par un modèle combinant couches de neurones de convolution et transformers. Cai et al (2023). Swin Unet3D: a three-dimensional medical image segmentation network combining vision transformer and convolution. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 23 : 33. Image distribuée sous la *Creative Commons Attribution 4.0 International License*.

nir les problèmes de santé, il faut les diagnostiquer dès que possible. Les premiers succès importants de l'IA dans la santé sont venus de l'analyse d'image. Les réseaux à neurones de convolution (CNN), inventés dans les années 1990s et déployés en vie réelle à la fin du siècle dernier, ont connu des progrès décisifs il y a une décennie avec l'apparition des CNN profonds. Ces modèles, ainsi que leurs dérivés, les "auto-encodeurs" ont permis de reconnaître tumeurs, anomalies vasculaires, défaut rétinien, etc. avec une exactitude qui a bientôt atteint, puis dépassé, celle des cliniciens humains. D'autres modèles reconnaissent désormais sur l'ADN circulant dans le sang (notamment originaire de cellules mortes) des mutations permettant de détecter par exemple des tumeurs cachées ou des séquences de bactéries provenant de la flore intestinale indiquant des troubles digestifs. En sus de la détection des troubles, les modèles permettent de classer la sévérité des atteintes, comme reconnaître les stades des cancers – ce qui permet de proposer des thérapies appropriées – ou bien différencier un foie gras bénin d'une stéatohépatite, ce qui est important car si la stéatohépatite précoce peut être réversible, elle ne l'est plus lorsque la fibrose s'est installée.

La médecine de précision

La définition des maladies repose largement, comme aux siècles derniers, sur les symptômes (ce que ressent le

patient) et les signes cliniques (les anomalies que le praticien peut mesurer), c'est-à-dire sur les conséquences plutôt que les causes. Si l'on veut s'acheminer vers une médecine personnalisée, il faut avant tout développer une médecine de précision, à savoir combattre des sous-types d'affections avec les traitements les plus appropriés ciblant les dysfonctionnements moléculaires et physiologiques sous-jacents. Les développements récents de l'IA, en particulier les approches multi-modales, sont à même de prendre en compte non seulement des données quantitatives (e.g., analyses de sang), de l'imagerie, des données génétiques, mais également des contenus textuels tels que des comptes-rendus médicaux. À terme, ces modèles devraient permettre aux cliniciens de proposer les schémas thérapeutiques optimaux et éviter les traitements pouvant entraîner des événements indésirables. Le dernier appel d'offre du PEPR (Programmes et équipements prioritaire de recherche) Santé Numérique (un investissement stratégique du programme "France 2030") est consacré aux "jumeaux numériques", en particulier fondés sur l'IA, qui permettraient de personnaliser thérapies et parcours patients.

L'identification des mécanismes moléculaires sous-tendant les maladies promet également l'identification de nouvelles cibles thérapeutiques, un aspect de la médecine de précision. À ce titre, le

modèle d'IA *Alphafold2* a révolutionné le domaine de la prédiction des structures moléculaires, en particulier des protéines, permettant de prédire leurs fonctions et dysfonctions mais également de concevoir de nouvelles protéines thérapeutiques remplissant des fonctions précises ou encore de proposer de nouvelles molécules qui viendraient cibler et modifier l'activité de nos protéines endogènes.

Épidémiologie et santé publique

Si les progrès de l'IA ont été remarquables dans le traitement des patients, ses promesses au niveau populationnel ne le sont pas moins. La disponibilité des données de l'assurance maladie au niveau national (le *Système National des Données de Santé*, SNDS, accessible via le BioDataHub) permet de suivre les grandes tendances de la santé. Une fois ces données couplées aux autres indicateurs épidémiologiques, on peut légitimement espérer une amélioration significative de la détection des menaces, le suivi de leur évolution, ainsi que la conception et l'évaluation de différents scénarios pour les combattre.

L'IA embarquée sera également une arme précieuse pour affronter la transition démographique déjà amorcée, vers une population plus âgée et présentant des affections affectant leur autonomie, physique et mentale. Robotique et IA pourraient dès lors assister un personnel soignant toujours plus sur la brèche.

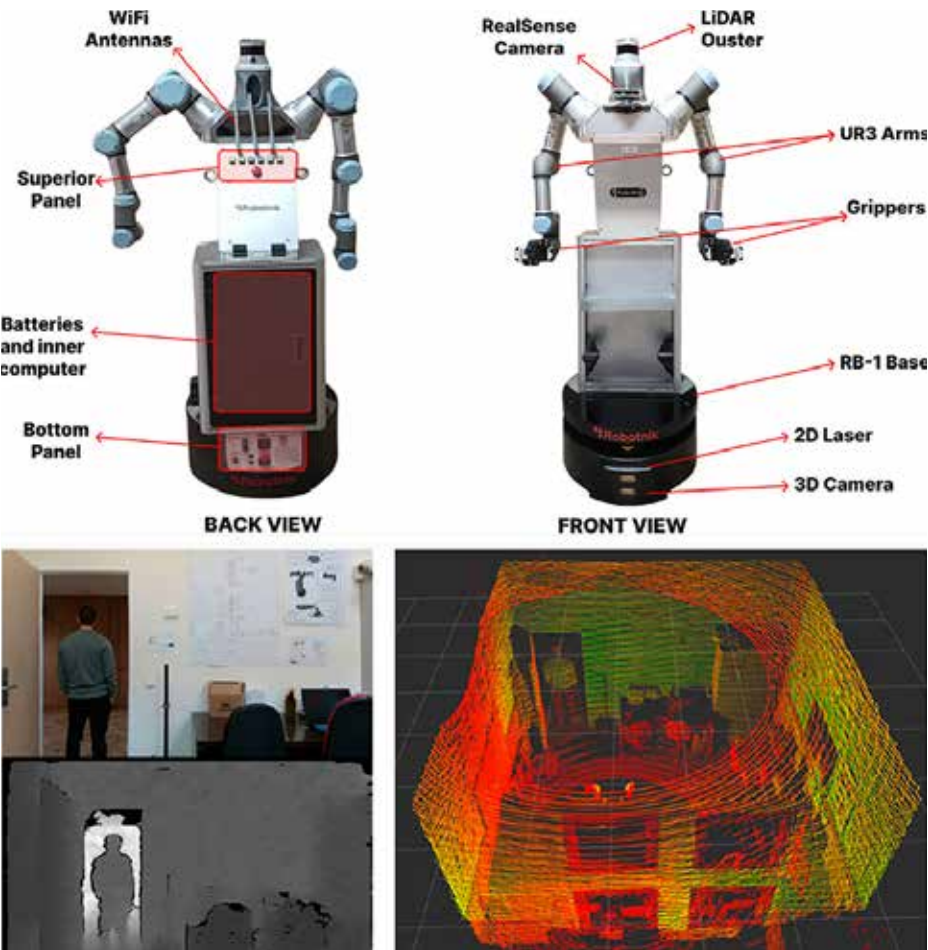


Les aspects éthiques et légaux

L'utilisation de l'IA dans le domaine de la santé ne va pas sans poser des problèmes éthiques autant que légaux. Tout d'abord, l'accès aux grandes quantités de données nécessaires à l'entraînement des modèles est soumis à des règles strictes. Cette problématique n'est d'ailleurs pas spécifique à la santé, voir par exemple les procès en cours des grands groupes de médias et des sociétés d'auteurs contre les sociétés OpenAI et Anthropic ayant utilisé de grands corpus de texte sans autorisation. Cependant, les données de santé sont particulièrement sensibles, ouvrant potentiellement la voie à des dérives, de la part des états, des employeurs, ou encore des compagnies d'assurance. Ces données sont donc de plus en plus confinées dans des environnements sécurisés où sont placés les modèles durant les phases d'apprentissage, pour faire ce que l'on appelle de l'"apprentissage fédéré", et où les modèles apprennent sur plusieurs jeux de données, chacun restant dans son silo. Cependant, l'avènement des grands modèles de langages a quelque peu changé la donne, puisqu'il est possible (dans des conditions très particulières et moyennant des approches sophistiquées) d'encoder les modèles à retourner certaines données utilisées pour l'apprentissage.

Un autre aspect à considérer est l'équité de l'accès aux soins. Les meilleurs modèles requièrent des infrastructures

Le robot Adam, créé pour assister les personnes âgées. Adam dispose de plusieurs capteurs lui permettant de reconnaître des objets et de se repérer dans l'espace. Il peut apprendre des tâches en imitant un être humain. Mora et al (2024). ADAM: a robotic companion for enhanced quality of life in aging population. *Frontiers in neurorobotics* 18 : doi:10.3389/fnbot.2024.1337608. Images distribuées sous la *Creative Commons Attribution License*.



informatiques conséquentes, ou des abonnements couteux. De plus, l'exactitude de leurs prédictions ou de leur diagnostic dépend de nombreuses données dont certaines ne sont pas disponibles pour tous les patients, que ce soit pour des raisons financières ou d'accès aux dispositifs médicaux nécessaires. Finalement, n'oublions pas que ces modèles sont souvent entraînés sur des cohortes d'essais cliniques. Pour de nombreuses raisons, ces cohortes sont

souvent biaisées, que ce soit au regard du sexe, de l'âge, de l'origine ethnique ou culturelle, ou encore du milieu socio-économique. Un modèle ayant appris à prédire les risques de diabète de type 2 sur des jeunes hommes blancs d'un milieu aisé (type même de l'étudiant volontaire pour un essai) ne sera pas nécessairement aussi exact sur une population de femmes de couleur d'âge moyen en situation de précarité. ■

BENJAMIN BEAUDET
DG BERTOLAMI
PROPOS RECUEILLIS PAR
RENÉ HYS 6663C



L'IA PAS FORCÉMENT OÙ L'ON PENSE
DES VÉHICULES AUTONOMES
DÉJÀ SUR NOS ROUTES



Navette Beti sur une de nos bases aériennes. © 2024 Bertolami Beti

Bonjour Benjamin, vous êtes le Directeur Général de Bertolami, une entreprise familiale créée en 1950 par vos grands-parents et vous avez, depuis 2018, mis en œuvre Beti, une filiale dédiée à l'exploitation de systèmes de transport automatisés de personnes et de marchandises en Europe. Ou en êtes-vous dans ce développement original ?

En 2024, nous sommes le 1^{er} opérateur européen de véhicules automatisés avec 6 véhicules en exploitation, ce qui peut paraître peu quand on entend parler du nombre de véhicules automatisés que l'on peut trouver aux États-Unis et en Chine.

Pour autant, c'est conforme à la trajectoire de la stratégie européenne et de la France en la matière.

La France, dès 2017, sous l'impulsion du Président Emmanuel Macron s'est dotée d'une stratégie nationale du véhicule automatisé et connecté. Ceci a permis de travailler de concert entre les filières industrielles, servicielles et l'administration pour se doter en 2024 d'une des réglementations les plus abouties au monde. Nous avons eu un premier temps d'expérimentations sur des sites dédiés et fermés puis nous avons pu nous confronter à la réalité de la circulations avec d'autres usagers et véhicules de la route.

Quels sont les fondamentaux de cette stratégie ?

Elle tient en trois piliers forts : concept de sécurité, mobilité partagée et pré-définition des parcours. Le cadre réglementaire impose aux différents acteurs de la chaîne de valeurs une haute exigence de la sécurité et de la cybersécurité avec des enjeux de démonstration préalable particulièrement efficaces pour garantir la mise en œuvre de services sûrs. Ces systèmes de transports doivent être sûrs car collectifs et partagés.

La France ne juge pas opportun le développement de ces systèmes pour un usage individuel à l'heure de la décarbonation et de la nécessaire résolution de la congestion dans les grands centres urbains. Dès lors, le développement s'est concentré sur les navettes automatisées et les livraisons partagées.

À ces deux exigences, l'Europe a choisi de cibler le niveau 4 sur 6 (de 0 – pas d'automatisation – à 5 – automatisation complète de la conduite) de la conduite automatisée qui autorise un véhicule à circuler exclusivement sur un parcours pré-défini, c'est-à-dire qu'il a appris dans sa phase de déploiement. Ainsi, lorsqu'il est mis en exploitation, il se concentre sur la nécessaire comparaison entre ce qu'il a appris et ce qu'il détecte grâce à des architectures de capteurs particulièrement efficaces de 250 mètres à 10 centimètres.